

真空室内凹对电磁分离器离子光学特性的影响

茅乃丰 李增海

(中国原子能科学研究院, 北京)

大型同位素电磁分离器真空室在大气压力作用下会出现严重的内凹现象。本文利用数值模拟方法, 分析了内凹对磁场分布和离子束聚焦特性的影响, 指出了一条消除内凹影响的有效途径。

关键词 离子光学, 数值模拟, 同位素电磁分离器, 真空室内凹。

一、引言

大型同位素电磁分离器(Calutron)中离子束的高度为10多cm, 束散角近 30° , 束流强度达几十毫安。为了使离子束具有良好的聚焦性能, 分离器采用非均匀二维磁场, 用安装在真空室上下铁盖板上的条形铁垫片成形(图1)。真空室为长方体, 四侧墙高几十厘米,

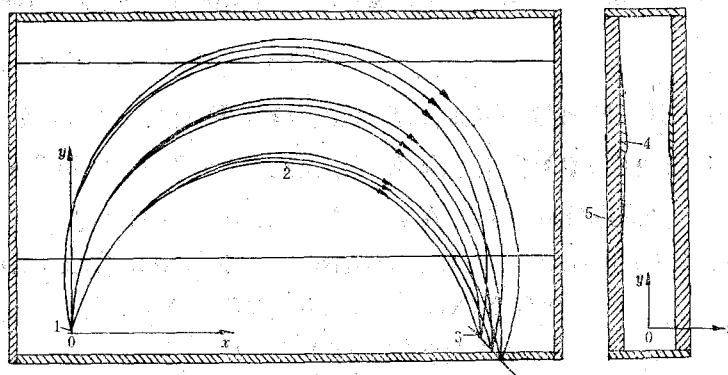


图1 同位素电磁分离器真空室、磁垫片和离子轨迹示意图

Fig.1 Schematic of the vacuum chamber, magnetic shims and ion trajectories of an electromagnetic isotope separator

1——离子源; 2——离子轨迹; 3——焦线与接收面; 4——磁垫片; 5——真空室盖板。

而上下盖板的长与宽却达几m。分离器运行时, 真空室盖板将附加受到大气压力和电磁力的作用。由于后者比前者小得多, 因此盖板将呈现严重的内凹现象。例如, 我院的一台分离器, 盖板厚9 cm, 面积 $4.37 \times 2.39 \text{ m}^2$, 上下盖板之间的间距40 cm, 抽真空后内凹呈不均匀分布, 内凹最大处的间距减小 $3.5 \text{ mm}^{[1]}$ 。显然, 盖板内凹将使磁场分布发生千分之几的畸变, 并进而影响离子束聚焦。值得注意的是, 真空室盖板与墙板之间采用橡皮密封, 系非刚性连接, 而且随分离的同位素种类不同, 磁场强度也不同。因此, 真空室盖板内凹对场分布和离子束聚焦的影响难于在设计过程中预先加以补偿。

本文尝试用数值模拟方法，通过建立盖板内凹模型，计算磁场在内凹下的分布及相应的离子运动轨迹，探求真空室盖板内凹对离子束聚焦特性影响的规律，并进而寻求一条消除内凹影响的途径。

二、内凹及磁场分布畸变

对电磁分离器真空室盖板内凹的测量结果表明^[1]，内凹量沿长宽方向(x 和 y 方向，图1)均近似呈正弦分布。例上盖板内凹引起的盖板内表面坐标的变化可表示为：

$$\Delta z = -a \sin(\alpha_2 x + \alpha_3) \sin(\alpha_4 y + \alpha_5) \quad (1)$$

其中 a 为盖板内凹幅值，系数 $\alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ 和 α_5 按盖板在四个边界上内凹为零加以确定。

盖板内凹情况下磁场分布的计算由TRIM程序^[2]完成。该程序利用三角形网格自动剖

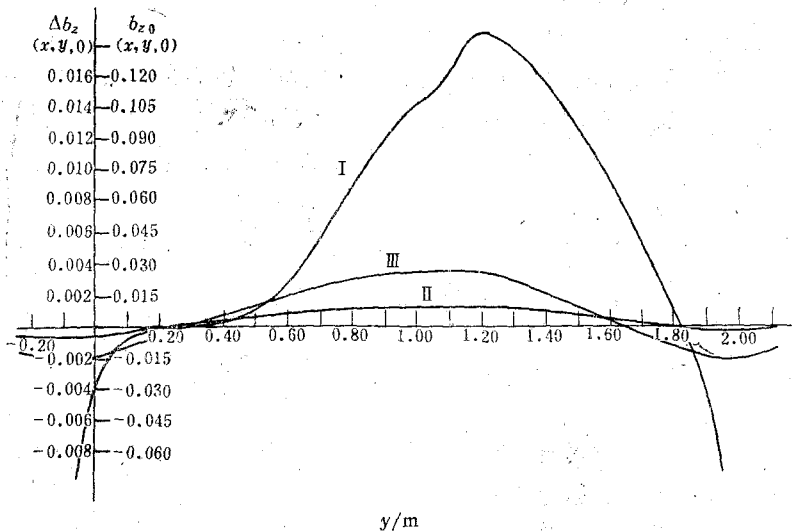


图 2 中间平面上磁场分布曲线

Fig.2. Median-plane magnetic field distributions

I——真空室内凹时 $b_{z_0}(x, y, 0)$ 分布曲线；

II, III——真空室内凹 $a_1=0.10$ cm时, $\Delta b_z(x, y, 0)$ 分布曲线, x 分别等于 0 和 1.425m.

分、有限差分 and 超松弛迭代方法求解二维非线性静磁偏微分方程。由于内凹与长度(x)方向有关，因此内凹情况下的场不再是二维场。但是，由于内凹沿 x 方向变化缓慢，场分布仍可利用二维程序，通过计算多个 x 值不同的(y, z)平面上的二维场获得。现以一台分离器作算例。这台分离器真空室盖板厚 10 cm，上下盖板之间的间距 35 cm，盖板面积 $3.65 \times 2.17 \text{ m}^2$ 。离子源出口缝，即计算时采用的坐标原点离左墙板和前墙板分别为 0.127 和 0.362 m。图 2 给出了这台分离器当盖板内凹为零时，中间平面($z=0$)上磁感应强度 z 向分量 $B_{z_0}(x, y, 0)$ 的归一化分布的非均匀部分(I) 为

$$b_{z_0}(x, y, 0) = B_{z_0}(x, y, 0) / B_{z_0}(x_0, y_0, 0) - 1,$$

其中 x_0 和 y_0 为场的归一化点的坐标。图中同时给出了当内凹幅值 $a_1=0.10$ cm 时中间平面上磁感应强度 $B_z(x, y, 0)$ 的归一化分布的非均匀部分

$b_z(x, y, 0) = B_z(x, y, 0) / B_z(x_0, y_0, 0) - 1$
与 $b_{z_0}(x, y, 0)$ 的偏差(II, III)

$$\Delta b_z(x, y, 0) = b_z(x, y, 0) - b_{z_0}(x, y, 0),$$

其中 $x=0$ 和 1.425 m 。由图可见, 最大偏差超过 3×10^{-8} 。

三、内凹对离子光学特性的影响

离子束聚焦特性在真空室内凹时的变化可以通过求解离子在畸变了的磁场 $\vec{B}(x, y, z)$ 中的运动微分方程

$$m \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = \frac{e}{c} \frac{d \vec{r}}{dt} \times \vec{B} \quad (2)$$

得到, 式中 m 为离子质量, e 是离子电荷, c 是光速, $\vec{r} = x\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k}$ 是离子轨迹的坐标矢量, t 是时间, $\vec{B}(x, y, z) = B_x(x, y, z)\vec{i} + B_y(x, y, z)\vec{j} + B_z(x, y, z)\vec{k}$ 。为了便于讨论, 将某一种离子的质量 m_0 和它在磁感应强度为 B_0 的均匀磁场中的轨道半径 $R_0 = c(2m_0V_0/e)^{1/2}/B_0$ 分别作为质量和长度单位, 其中 V_0 是离子受到的加速电压。此外再引入 $\sigma = teB_0/m_0c$, 则方程(2) 即化为无量纲形式

$$\begin{cases} C_m \frac{d^2 x}{d\sigma^2} = \frac{B_z}{B_0} \frac{dy}{d\sigma} - \frac{B_y}{B_0} \frac{dz}{d\sigma} \\ C_m \frac{d^2 y}{d\sigma^2} = \frac{B_x}{B_0} \frac{dz}{d\sigma} - \frac{B_z}{B_0} \frac{dx}{d\sigma} \\ C_m \frac{d^2 z}{d\sigma^2} = \frac{B_y}{B_0} \frac{dx}{d\sigma} - \frac{B_x}{B_0} \frac{dy}{d\sigma} \end{cases} \quad (3)$$

式中, $C_m = m/m_0$ 称为同位素质量比。通常 C_m 在 $0.95-1.05$ 范围内变化, $C_m=1$ 的离子束称为中心束, $C_m \neq 1$ 的称为旁束。

运动方程的求解采用四阶龙格-库塔数值积分方法。积分中, 磁感应强度 $\vec{B}(x, y, z)$ 借助于级数展开, 用中间平面上 $B_z(x, y, 0)$ 的拟合双三次样条函数

$$B_z(x, y, 0) = \sum_{k,l=1}^4 a_{ijkl} (x-x_i)^{k-1} (y-y_j)^{l-1} \quad (4)$$

$$\left(\begin{array}{l} x_i \leq x \leq x_{i+1}, y_j \leq y \leq y_{j+1} \\ i=1, 2, \dots, n-1; j=1, 2, \dots, m-1 \end{array} \right)$$

的系数来表示^[3]。于是利用(3)式就不难得到在不同场分布下具有给定初始条件(坐标 x_0, y_0, z_0 ; 速度方向与 (y, z) 平面和 (x, z) 平面的夹角 α_0 和 β_0) 的离子轨迹。图 3 给出了内凹为零时上述算例磁场中, $x_0=y_0=z_0=\beta_0=0, \sin\alpha_0=-0.25(0.05)0.25$ 的中心束($C_m=1$) 在焦点附近的束形。显然, 由该束形图, 不难确定离子束的象宽(d) 和焦点位置(x_f, y_f)。

图 4 给出了算例磁场中, 不同质量比 C_m 的离子束的象宽, 包括真空室内凹为零及内凹分别取为 $a_1=0.05, 0.10$ 和 0.15 cm 时四种不同场分布下的结果。图 5 则给出了四种

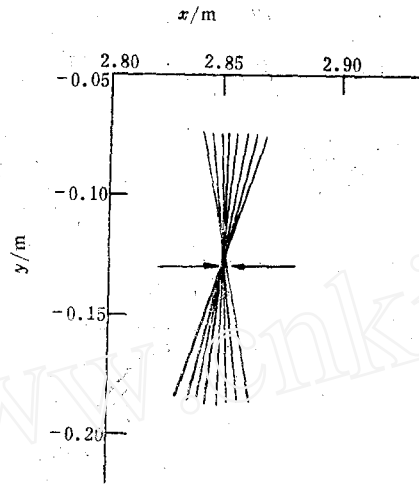


图 3 真空室无内凹时中心束束形

Fig.3 Central beam pattern for the vacuum chamber without inward concavity

$C_m = 1.00$; $d = 0.27\text{cm}$; $x_f = 2.8506\text{m}$; $y_f = -0.1316\text{m}$.

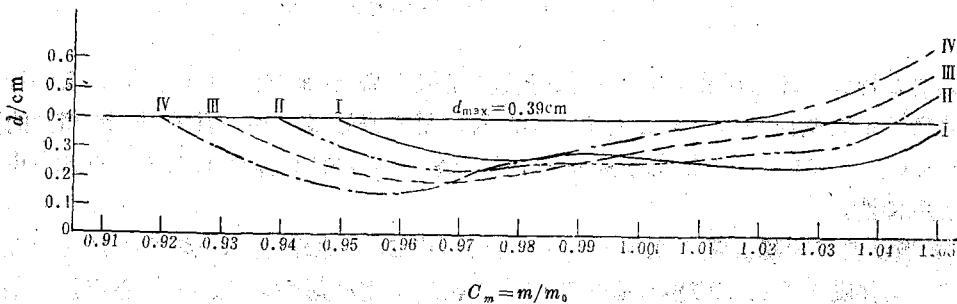


图 4 象宽 d 随质量比 C_m 的变化

Fig.4. Variation of the image widths as a function of mass ratio C_m

曲线 I—IV 分别与真空室盖板内凹幅值 $\alpha_1 = 0, 0.05, 0.10, 0.15\text{cm}$ 相对应。

不同场分布下由离子束焦点连接成的焦线。由图 4 可见，当内凹幅值从零增大到 0.15cm 时，质量比在 $0.95-1.05$ 范围内的离子束最大象宽从 0.39 增大到 0.66cm ，几乎增加了一倍。显然，内凹对分离器离子光学特性的影响是严重的。

四、消除内凹影响的途径

分析象宽 d 随质量比 C_m 的变化曲线(图 4) 可见，随着内凹量的增大，质量比大的离子束的象宽增大，而质量比小的离子束的象宽却减小。如果无内凹时质量比 C_m 在 $0.95-1.05$ 范围的离子束的象宽不大于某一值 d_{max} ，则当出现内凹时仍然存在着一个变化达 10% 的质量比范围，在这个范围内的离子束的象宽不超过 d_{max} 。但这个范围的中心 C_{m0} 不再是 1 ，而要略小一些。如图 4 算例中，当 $\alpha_1 = 0.10\text{cm}$ 时，这个质量范围在 $C_m = 0.93-1.03$ ，中心 $C_{m0} = 0.98$ 。由此不难引出一条消除内凹对离子束象宽影响的途径，它要求：

1. 适当提高磁感应强度 考虑到不同质量比 C_m 的离子束在离子源中获得相同的加速

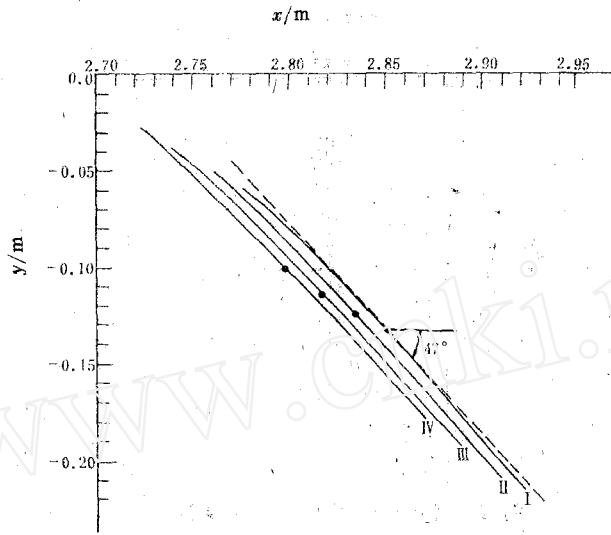


图 5 焦线与接收面形状

Fig.5 Focusing lines and receiving surfaces

曲线 I—IV 分别与真空室盖板内凹幅值 $\alpha_i = 0, 0.05, 0.10, 0.15\text{cm}$ 相对应; 虚线为曲线 I 的切线; 点·为调整后中心束的焦点。

能量, 则由方程(2) 不难看出; 如果把磁感应强度提高到原来的 $1/\sqrt{C_{m0}}$ 倍, 则质量比 $C_m = 1$ 的离子束将按原来 $C_m = C_{m0}$ 的离子束的运动规律来运动, 因而具有与其相同的聚焦特性, 而 $C_m = 0.95 - 1.05$ 的离子束也将具有原来 $C_m = 0.95 C_{m0}$ 至 $1.05 C_{m0}$ 的离子束所具有的聚焦特性。

2. 适当调整接收器位置 由图 5 可见, 随着内凹的出现及增大, 离子束焦线向左呈整体移动。而伴随适当提高磁感应强度以消除内凹对象宽的影响, $C_m = 1$ 中心束焦点的位置又移到原来质量比为 C_{m0} 的旁束焦点的位置上。因此, 必须调整接收器位置, 使其表面与相应内凹下的焦线重合, 并把中心移到原来 C_{m0} 旁束焦点的位置上, 如图 5 所示。

五、结 束 语

真空室盖板内凹对离子束聚焦特性影响的数值模拟结果表明, 适当提高磁感应强度和调整接收器位置, 能够消除内凹对离子束象宽的影响。由于内凹难以在设计过程中预先估算, 而且在设备实际运行中又不断变化, 因此上述消除内凹影响的途径是十分有效的。这一有效性在分离器离子光学系统调整中已经得到了验证^[1]。

参 考 文 献

- [1] 茅乃丰等, 原子能科学技术, 10(4), 318(1976)。
- [2] Winslow, A.M., *J. Comput. Phys.*, 1, 149(1966)。
- [3] 茅乃丰、李增海, 空间磁场分布的双三次样条函数表述, 高能物理与核物理, 待发表。

(编辑部收到日期: 1988年1月21日)

EFFECT OF VACUUM CHAMBER INWARD- CONCAVITY ON ION OPTICAL CHARAC- TERISTICS OF ELECTROMAGNETIC ISOTOPE SEPARATORS

MAO NAIFENG LI ZENGHAI

(Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275, Beijing)

ABSTRACT

The vacuum chambers of large-scale electromagnetic isotope separators (Calutrons) are of serious inward-concavity under the atmospheric pressure. The numerical simulation method is used to analyse the effect of inward-concavity on the magnetic field distribution and ion beam focussing characteristics. It is pointed out that strengthening the magnetic induction and adjusting the position of receiver adequately for a constructed apparatus can eliminate the effect of inward-concavity on the image widths of beams. This idea is verified through adjustment of an electromagnetic isotope separator.

Key words Ion optics, Numerical simulation, Electromagnetic isotope separator, Vacuum chamber inward-concavity.